

Struktur mikro dan Sifat Fisik-Mekanik Beton Ringan Tanpa Pematangan dalam Autoclave (Non Autoclaved Aerated Concrete, NAAC) (Sri Harjanto)

Akreditasi LIPI Nomor : 536/D/2007

Tanggal 26 Juni 2007

STRUKTURMIKRO DAN SIFAT FISIK-MEKANIK BETON RINGAN TANPA PEMATANGAN DALAM AUTOCLAVE (NON AUTOCLAVED AERATED CONCRETE, NAAC)

Sri Harjanto¹, Prima Sony¹, Bambang Suharno¹ dan Henki W. Ashadi²

¹Departemen Metalurgi dan Material, FT - UI

Kampus Baru UI, Depok 16424

²Departemen Sipil, FT - UI

Kampus Baru UI, Depok 16424

ABSTRAK

STRUKTURMIKRO DAN SIFAT FISIK-MEKANIK BETON RINGAN TANPA PEMATANGAN DALAM AUTOCLAVE (NON AUTOCLAVED AERATED CONCRETE, NAAC). Pembuatan beton ringan umumnya menekankan pada dua hal, yaitu massa jenis yang serendah mungkin dan kuat tekan yang setinggi-tingginya. Penelitian ini mengamati struktur makro dan struktur mikro, sifat fisika-mekanika dan keterkaitannya satu sama lain. Dalam penelitian ini, beton ringan dibuat tanpa pematangan dalam *autoclave* (Non Autoclaved Aerated Concrete, NAAC) dengan penambahan senyawa pengaerasi Al (2 % massa) dan H₂O₂ (32 % massa) secara terpisah. Alkalinitas campuran beton ringan ini dikontrol dengan penambahan kapur sampai jumlah tertentu. Diperoleh hasil massa jenis beton ringan NAAC dengan senyawa pengaerasi Al dan H₂O₂ masing-masing adalah 1126 kg/m³ dan 1163 kg/m³. Sedangkan kuat tekan yang dihasilkan dari beton ringan dengan senyawa pengaerasi Al dan H₂O₂ masing-masing adalah 2,74 MPa dan 3,48 MPa. Massa jenis beton ringan NAAC masih lebih tinggi, sedangkan kuat tekannya relatif lebih rendah dibanding beton ringan dengan pematangan dalam *autoclave* (Autoclaved Aerated Concrete, AAC). Hasil penelitian ini juga mengindikasikan pengaruh pori terhadap massa jenis dan fasa struktur mikro dengan kuat tekan.

Kata kunci : Beton busa, Beton ringan, Material seluler, Senyawa pengaerasi, NAAC

ABSTRACT

THE NON AUTOCLAVED AERATED CONCRETE (NAAC) MICROSTRUCTURE AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES. The production of light concrete is focused in achieving the best physical-mechanical properties, such as the lowest density and the highest compression strength. The study aims to observe the microstructure, physical-mechanical properties and their relations of light concrete. In this study, NAAC was fabricated by using Al (2 mass%) and H₂O₂ (32 mass%) as aerating agents. Alkalinity of the concrete mixture was controlled by addition of lime. The result showed the density of NAAC with aerating agents of Al and H₂O₂ was 1126 and 1163 kg/m³, respectively. On the other hand, the compression strength of NAAC with aerating agents of Al and H₂O₂ was 2,74 and 3,48 MPa, respectively. The density of NAAC is still higher and its compression strength is lower compared with Autoclaved Aerated Concrete (AAC). The results also indicated that the macro and microstructure (porosity and phase) may affect to the physical-mechanical properties (density and strength) of light concrete.

Key words : Concrete foam, Light concrete, Cellular materials, Aerating agent, NAAC

PENDAHULUAN

Beton ringan atau dikenal pula dengan beton seluler atau beton aerasi merupakan beton yang dibuat dengan teknik tertentu sehingga memiliki kandungan pori dalam jumlah besar. Pori-pori yang merupakan karakteristik khas beton ringan itu sengaja dibentuk sehingga menyebabkan beton itu jauh lebih ringan dibanding beton konvensional umumnya. Saat ini beton ringan banyak digunakan sebagai pengganti batu bata,

khususnya untuk gedung-gedung bertingkat tinggi dan umumnya bangunan lain. Karakteristik beton ini memiliki keunggulan ekonomi yang kompetitif selain luasnya aplikasi, seperti sebagai bahan insulasi maupun sebagai produk olahan hasil daur ulang limbah abu terbang [1, 2].

Pori yang terdapat pada beton ringan dapat dibentuk secara artifisial melalui beberapa cara. Pertama,

pembentukan pori dilakukan secara mekanika melalui penambahan senyawa pembusa (*foaming agent*) yang dicampurkan sebagian air terlebih dahulu atau dicampur langsung ke dalam adukan [3, 4]. Senyawa pembusa yang biasa digunakan dengan cara ini antara lain detergen, saponin, keratin dan lain-lain. Kedua, pori dibentuk dalam beton secara kimia, melalui penambahan unsur atau senyawa seperti Al, Zn, H_2O_2 , asetilen (C_2H_2) atau kalsium karbida (CaC_2) yang bereaksi dengan alkali yang terdapat dalam campuran beton sehingga menghasilkan gas sebagai produk reaksi [4]. Untuk meningkatkan sifat alkalinitas, biasanya kapur ($CaCO_3$) ditambahkan ke dalam campuran beton. Pembentukan pori dengan cara mekanis dipandang relatif lebih ekonomis dan terkontrol dalam proses pembuatan beton ringan.

Pori yang terbentuk baik sebagai hasil pembentukan mekanis maupun kimia dapat diklasifikasikan lagi atas beberapa jenis, yaitu: (1) pori udara buatan, pori inter klaster dan pori inter partikel, (2) pori makro yang terbentuk akibat ekspansi massa yang disebabkan oleh aerasi, (3) kapiler mikro (< 50 nm) dan kapiler makro (50 nm hingga 50 μm) [5-8]. Meskipun pengklasifikasian di atas adalah untuk beton yang dimatangkan dalam *autoclave* (*Autoclaved Aerated Concrete*, AAC), klasifikasi di atas diperkirakan memiliki kemiripan dengan beton yang dimatangkan tanpa *autoclave* (*Non Autoclaved Aerated Concrete*, NAAC).

Penelitian ini bermaksud untuk mengembangkan beton ringan NAAC, mengingat beton ringan belum banyak dikomersialisasi dibanding AAC. Tambah lagi, pembuatan beton ringan NAAC relatif lebih hemat energi dibanding AAC karena pemrosesannya tanpa menggunakan *autoclave*. Di sisi lain, pori-pori pada beton ringan diyakini menentukan struktur, sifat fisika dan sifat mekanis dari beton ringan. Namun demikian, fasa-fasa yang terbentuk diduga juga memiliki kontribusi yang signifikan terhadap sifat mekanik beton ringan. Oleh karena itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengkaji struktur makro dan mikro beton ringan NAAC dan sifat fisika (massa jenis)-mekanika (kuat tekan) beserta keterkaitannya satu sama lain dari berbagai kondisi campuran bahan baku.

METODE PERCOBAAN

Bahan

Bahan baku pembuatan beton ringan NAAC ini terdiri dari pasir sungai dengan ukuran partikel rata-rata 170 μm , semen portland dengan ukuran rata-rata 106 μm dan air. Campuran antara semen dan pasir dibuat dengan perbandingan berat 1:3.

Kapur ($CaCO_3$) ditambahkan ke dalam campuran untuk meningkatkan alkalinitas campuran. Penambahan kapur pada batas tertentu dilakukan untuk mensubstitusi penggunaan semen. Perbandingan jumlah kapur yang ditambahkan dalam campuran beton memiliki perbandingan kapur sebesar 12,5% sampai dengan

62,5% dari jumlah semen yang ditambahkan. Ukuran rata-rata partikel kapur yang ditambahkan adalah 63 μm .

Senyawa pengaerasi yang digunakan adalah logam aluminium serbuk dalam bentuk pasta dan larutan H_2O_2 . Sebagai senyawa pengaerasi, pasta aluminium ditambahkan dalam jumlah berlebih untuk bereaksi dengan alkali, yaitu sebanyak 2 % massa dari campuran beton. Sedangkan larutan H_2O_2 (30 % vol) ditambahkan sebanyak 32 % massa dari total massa campuran beton.

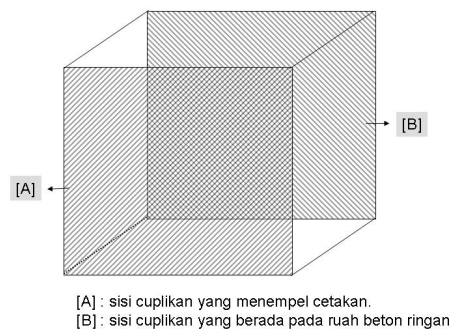
Preparasi dan Karakterisasi

Bahan-bahan dasar campuran beton diperiksa komposisi kimianya, seperti semen dan kapur, dengan menggunakan *X-Ray Diffractometer* (XRD, Philips Instruments). Pemeriksaan ini ditujukan untuk mengetahui bahwa bahan-bahan tersebut bisa saling mensubstitusi.

Beton ringan dibuat dengan mencampurkan bahan-bahan dasar yang telah disiapkan sesuai dengan komposisi pasir, semen, kapur, senyawa pengaerasi dan air yang telah ditentukan sebelumnya [9]. Pengadukan campuran bahan-bahan dasar itu dilakukan sehomogen mungkin. Senyawa pengaerasi ditambahkan pada akhir pengadukan.

Pasta beton yang telah diaduk merata, kemudian dicetak pada cetakan logam berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm. Campuran beton didiamkan dalam cetakan di temperatur kamar selama 28 hari, agar reaksi hidrasi terjadi dengan sempurna. Tidak ada perlakuan tambahan selama proses pematangan di ruangan dengan suhu kamar sekitar 25 °C dan tekanan 1 atm.

Setelah waktu pematangan selesai, beton ringan yang telah terbentuk diamati strukturmakro dan strukturmikro dengan menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscope* (SEM, Leo Instruments Co.). Pengambilan foto strukturmakro cuplikan diperlihatkan pada Gambar 1. Cuplikan diambil pada bagian yang bersentuhan dengan cetakan (sisi [A]) dan yang berada pada ruah beton ringan (sisi [B]). Fasa-fasa yang terdapat pada beton ringan juga diamati komposisi kimianya dengan *Electron Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX). Selanjutnya dilakukan pengujian



Gambar 1. Ilustrasi skematis cuplikan beton ringan berbentuk kubus berdimensi (1 x 1 x 1) cm^3 .

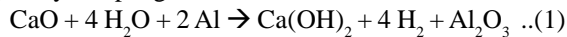
sifat fisika dan mekanika dengan memperhatikan struktur yang ada pada beton ringan sesuai komposisi masing-masing.

HASIL DAN PEMBAHASAN

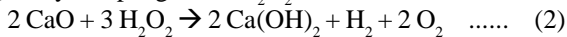
Pori Beton Ringan

Dari hasil pengamatan struktur beton ringan yang dihasilkan dari percobaan, diamati terbentuknya pori, baik berukuran makro (lebih dari 50 μm) maupun mikro (kurang dari 50 μm). Pori tersebut terbentuk dari reaksi hidrasi antara senyawa pengerasi dengan senyawa alkali yang terkandung dalam kapur dan semen. Reaksi yang terjadi dalam pembentukan pori dapat digambarkan dengan persamaan berikut:

(a) Senyawa pengerasi Al :



(b) Senyawa pengerasi H_2O_2 :

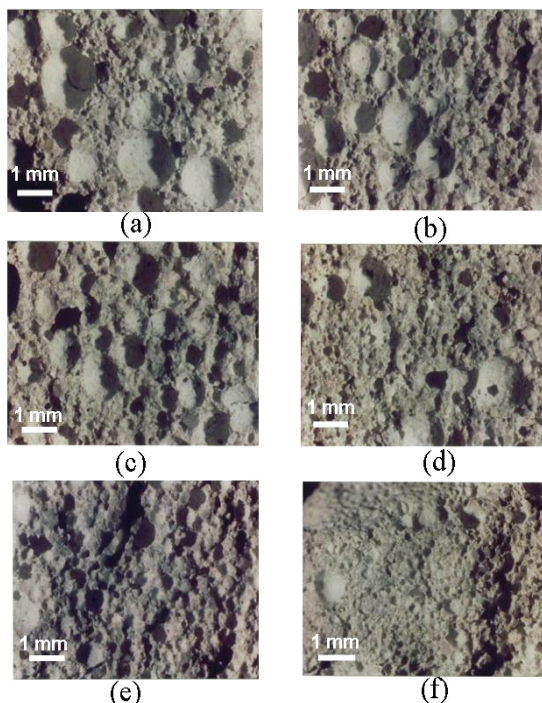


Baik gas oksigen maupun hidrogen memiliki kontribusi dalam pembentukan pori pada beton ringan. Pada beton ringan dengan penambahan senyawa pengerasi Al maka gas yang membentuk pori adalah hidrogen, sedangkan pada beton ringan dengan penambahan senyawa aerasi H_2O_2 , pori terbentuk oleh campuran gas hidrogen dan oksigen. Secara umum, tidak

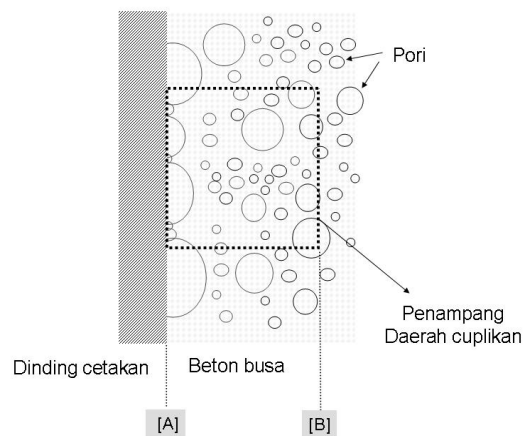
nampak perbedaan yang nyata antara pori dalam beton ringan yang terbentuk dengan penambahan senyawa pengerasi Al atau H_2O_2 . Pada beton ringan dengan penambahan senyawa pengerasi Al akan mudah didapati sisa partikel aluminium yang tidak bereaksi dengan CaO.

Struktur makro cuplikan pada sisi [A] (melekat di cetakan) dan [B] (ruah beton ringan) dibandingkan pada Gambar 2 dari berbagai kondisi campuran kapur (37,5%, 50% dan 62,5% dari berat semen yang ditambahkan) dengan senyawa pengerasi H_2O_2 . Perbandingan gambar secara horisontal (Gambar 2(a) - Gambar 2(b), Gambar 2(c) - Gambar 2(d) dan Gambar 2(e) - Gambar 2(f)) memperlihatkan perbedaan morfologi antara pori pada sisi [A] dan sisi [B]. Bagian beton ringan yang melekat di cetakan umumnya memiliki pori yang lebih besar (Gambar 2 (a), Gambar 2(c) dan Gambar 2(e)) dibanding bagian ruah beton (Gambar 2 (b), Gambar 2(d) dan Gambar 2(f)). Pada bagian dinding cetakan pori mengalami kombinasi dengan pori lainnya sehingga mengalami perbesaran.

Gambar 3 memperlihatkan ilustrasi skematis perbedaan antara dimensi pori sisi [A] dan sisi [B]. Dinding cetakan memberikan permukaan yang kondusif untuk penumbuhan pori sehingga memungkinkan terjadinya kombinasi pori yang mengakibatkan peningkatan ukuran pori dibanding di bagian ruah beton ringan (sisi [B]).

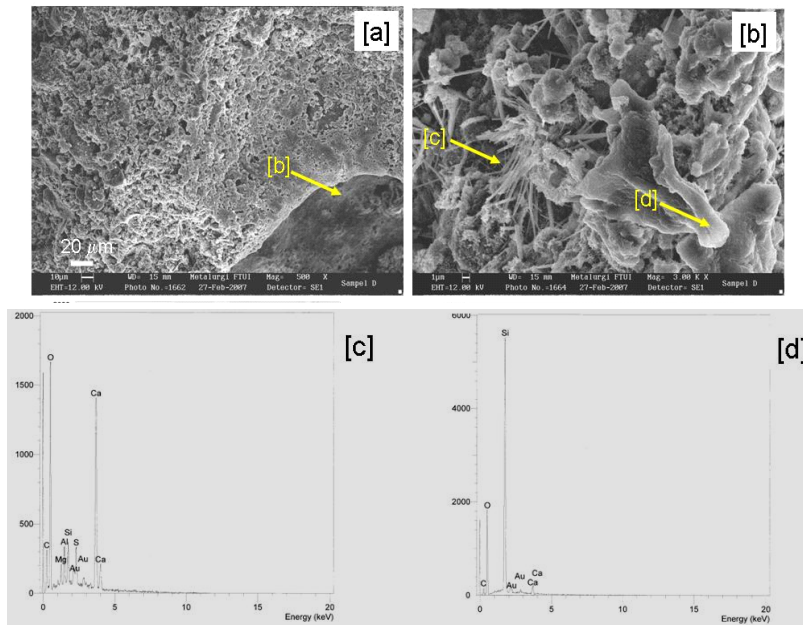


Gambar 2. Struktur makro beton ringan (NAAC) dengan senyawa pengerasi H_2O_2 dengan penambahan kapur (persentase dari semen yang ditambahkan) 37,5% (a), (b); 50% (c), (d); dan 62,5% (e), (f). Sisi yang melekat di cetakan (sisi [A]) adalah (a), (c) dan (e), sisi dalam ruah beton ringan (sisi [B]) adalah (b), (d) dan (f).



Gambar 3. Ilustrasi skematis perbandingan pori beton busa atau beton ringan antara sisi [A] dan [B].

Di sisi lain, penambahan kapur tidak secara langsung berkorelasi dengan peningkatan ukuran pori, sebaliknya ada kuantitas optimal dalam reaksi pembentukan gas tersebut. Kuantitas optimal di sini berkaitan dengan jumlah stoikiometri antara CaO dengan senyawa pengerasinya, baik Al maupun H_2O_2 . Oleh karena itu, penambahan kapur yang sesuai dengan jumlah senyawa pengerasi akan menghasilkan sifat beton ringan yang optimal pula [10].



Gambar 4. Strukturmikro tipikal beton ringan (NAAC) dengan senyawa pengerasi H_2O_2 . Tanda panah menunjukkan lokasi perbesaran gambar dan uji komposisi dengan EDX. (a) perbesaran 500 x, (b) perbesaran 3000 x, (c) komposisi unsur struktur serat, (d) komposisi unsur struktur lempeng tidak beraturan

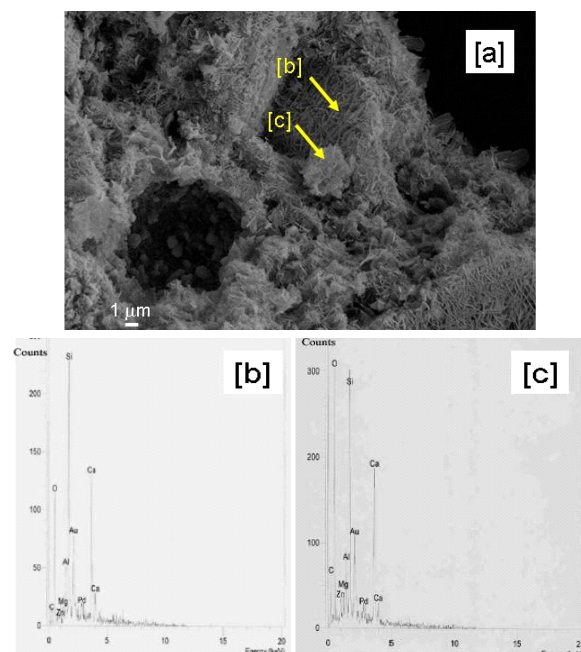
Fasa dan Strukturmikro

Gambar 4(a) dan Gambar 4(b) memperlihatkan strukturmikro dari salah satu beton ringan (NAAC) dengan senyawa pengerasi H_2O_2 dengan penambahan kapur 50% dari kadar semen. Gambar 4 (a) menunjukkan keberadaan pori mikro (diameter kurang dari 50 μm) pada permukaan pori makro (diameter lebih dari 50 μm). Pada perbesaran yang lebih tinggi (Gambar 4 (b)), nampak fasa-fasa pembentuk strukturmikro beton ringan, berupa struktur serat (c) dan struktur lempeng tidak beraturan (d). Pemeriksaan unsur dengan menggunakan *Electron Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX) dari struktur serat (c) dan lempeng tidak beraturan (d) ditampilkan pada Gambar 4(c) dan Gambar 4(d).

Struktur serat beton ringan (NAAC) ini (Gambar 4 (c)) terdiri dari unsur Ca, Si, Al dan O. Unsur lainnya seperti Au muncul dari lapisan (*coating*) SEM. Unsur C dan Mg merupakan pengotor dari pasir, sedangkan sulfur (S) dimungkinkan muncul dari pengotor semen. Struktur serat tersebut dikenal dengan nama *ettringite* berupa senyawa kalsium-alumino-sulfat, $3CaO \cdot Al_2O_3$ dengan SO_3 berasal dari semen [11]. Sedangkan unsur lainnya Si, diperkirakan dari senyawa $CaO \cdot SiO_2$ yang terdeteksi dari struktur lempeng tidak beraturan didekat struktur serat *ettringite*. Pada Gambar 4(d) keberadaan senyawa $CaO \cdot SiO_2$ terdeteksi dengan baik pada struktur lempeng tidak beraturan. Fasa lainnya yang dimungkinkan ada pada beton ringan NAAC ini adalah $CaO \cdot H_2O$ yang berbentuk struktur butiran yang nampak sebagai latar belakang Gambar 4(b).

Gambar 5(a) menampilkan gambaran fasa dan strukturmikro beton ringan komersial (AAC). Dari

pemeriksaan EDX yang diperlihatkan Gambar 5(b) dan Gambar 5(c) muncul unsur Al yang berasal dari senyawa pengerasi beton ringan AAC ini. Meskipun unsur Al bisa pula muncul dari bahan baku beton ringan yang digunakan di luar senyawa pengerasi. Unsur lainnya seperti Mg dan Zn terdeteksi dari pengotor senyawa pengerasi yang digunakan. Sedangkan emas (Au) merupakan bahan pelapis uji SEM yang terkadang



Gambar 5. Strukturmikro tipikal beton ringan komersial (AAC). (a) perbesaran 3000 x, (b) komposisi unsur strukturmikro titik [b], (c) komposisi unsur strukturmikro titik (c).

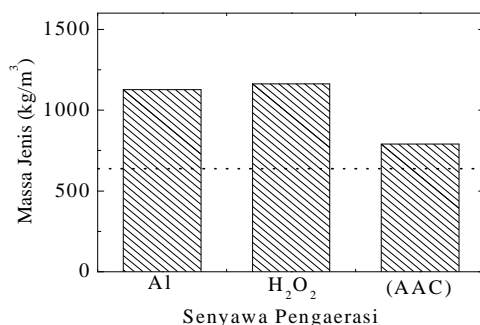
mengandung unsur pemadu Pd. Baik Gambar 5(b) dan gambar 5(c) mengindikasikan keberadaan struktur serat *ettringite*. Tambah lagi senyawa lain seperti kalsium hidrat ($\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$) dan kalsium silika hidrat ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) juga diindikasikan terdapat pada beton ringan AAC ini. Dengan membandingkan Gambar 4(a) dan Gambar 5(a), secara kualitatif beton ringan AAC lebih banyak mengandung senyawa serat *ettringite* dibanding beton ringan NAAC. Hal ini bisa saja dimungkinkan, sebagai akibat proses pematangan di *autoclave* yang lebih mampu mendorong pembentukan struktur tersebut dibanding jika pematangan itu dilakukan secara alami.

Sifat Fisik-Mekanik

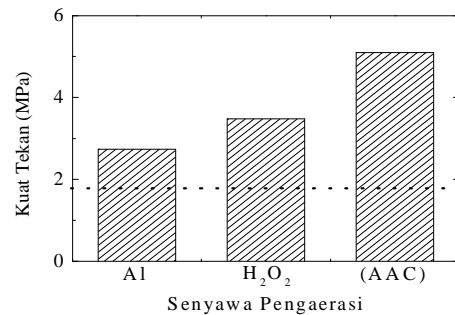
Sifat fisika-mekanika yang diujikan terhadap beton ringan NAAC ini adalah besaran berat jenis (densitas) dan kuat tekan. Berat jenis dan kuat tekan yang diperbandingkan di antara beton NAAC adalah antara senyawa pengaerasi Al dan H_2O_2 pada kondisi yang paling optimal. Selain itu, kedua sifat fisika-mekanika beton ringan NAAC tersebut dibandingkan juga dengan beton ringan AAC.

Gambar 6 memperlihatkan perbandingan massa jenis antara beton ringan NAAC dengan senyawa pengaerasi aluminium (Al) dan hidrogen peroksida (H_2O_2). Pada gambar tersebut garis putus-putus menunjukkan batas bawah rentang massa jenis beton ringan yaitu 640 kg/m^3 hingga 1600 kg/m^3 [12]. Massa jenis beton ringan NAAC dengan senyawa pengaerasi Al adalah 1126 kg/m^3 dan H_2O_2 sebesar 1163 kg/m^3 . Sedangkan beton ringan AAC memiliki massa jenis sebesar 790 kg/m^3 . Perbedaan massa jenis antara beton ringan NAAC mengindikasikan kuantitas pori yang terbentuk. Nampak bahwa senyawa pengaerasi Al relatif lebih efektif dalam menghasilkan pori dibanding H_2O_2 . Namun demikian pematangan dalam *autoclave* secara signifikan mampu menghasilkan sebaran pori yang lebih merata sehingga dihasilkan massa jenis yang kecil.

Gambar 7 memperlihatkan perbandingan kuat tekan antara beton ringan NAAC dengan senyawa pengaerasi Al dan H_2O_2 , serta beton ringan AAC.



Gambar 6. Massa jenis beton ringan (NAAC) dengan senyawa pengaerasi Al dan H_2O_2 dibandingkan dengan beton ringan komersial AAC. Garis putus-putus adalah batas bawah massa jenis beton ringan dengan rentang 640 kg/m^3 sampai dengan 1600 kg/m^3 .



Gambar 7. Kuat tekan beton ringan (NAAC) dengan senyawa pengaerasi Al dan H_2O_2 dibandingkan dengan beton ringan komersial AAC. Garis putus-putus adalah batas bawah kuat tekan beton ringan dengan rentang 1,8 MPa sampai dengan 8,5 MPa.

Garis putus-putus pada Gambar 7 memperlihatkan batas bawah rentang kuat tekan untuk beton ringan, yaitu antara 1,8 MPa sampai dengan 8,5 MPa. Dari hasil pengujian diketahui bahwa beton ringan NAAC dengan senyawa pengaerasi Al memiliki kuat tekan 2,74 MPa, H_2O_2 3,48 MPa, sedangkan beton ringan AAC 5,1 MPa.

Dari data kualitatif fasa dan struktur mikro, dapat diduga bahwa keberadaan struktur serat *ettringite* pada beton ringan AAC yang lebih banyak sangat berperan dalam meningkatkan sifat mekanik beton ringan, dalam hal ini kuat tekan. Penelitian lanjut yang lebih rinci perlu dilakukan untuk mengamati lebih jauh lagi hubungan antara struktur ini dengan sifat mekanik beton ringan.

KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan beberapa hal, sebagai berikut:

1. Beton ringan tanpa pematangan dalam autoclave (NAAC) telah dihasilkan dengan menggunakan senyawa pengaerasi aluminium (2% massa) dan H_2O_2 (32% massa).
2. Massa jenis beton ringan NAAC dengan senyawa pengaerasi Al relatif lebih rendah (1126 kg/m^3) dibanding dengan H_2O_2 (1163 kg/m^3).
3. Kuat tekan beton ringan NAAC dengan senyawa pengaerasi Al relatif lebih rendah (2,74 MPa) dibanding dengan H_2O_2 (3,48 MPa).
4. Sifat fisika (massa jenis) beton ringan NAAC masih lebih tinggi dibanding AAC, sedangkan sifat mekanika (kuat tekan) NAAC relatif lebih rendah dibanding AAC.
5. Diperoleh indikasi awal bahwa massa jenis dan kuat tekan beton ringan NAAC dipengaruhi oleh pori dan fasa yang terbentuk.

DAFTARACUAN

- [1]. N. NARAYANAN and K. RAMAMURTHY, *Cement & Concrete Composite*, **22** (2000) 321-329
- [2]. R. M. DILMORE and R. D. NEUFELD, *J. of Energy Eng.*, **8** (2001) 37-50

- [3]. R.C. VALORE, *J. Am. Concr. Inst.*, **25** (1954) 773-795
- [4]. R.C. VALORE, *J. Am. Concr. Inst.*, **25** (1954) 817-836
- [5]. N. NARAYANAN and K. RAMAMURTHY, *Cement & Concrete Composite*, **30** (2000) 457-464
- [6]. M.S.J GANI, *Cement and Concrete*, Chapman and Hall Publ., London (1997) 85
- [7]. J. ALEXANDERSON, *Cem. Conr. Res.*, **9**(1979) 507-514
- [8]. K. RAMAMURTHY and N. NARAYANAN, *Magazine of Concrete Research*, **52**(3) (2000) 163-168
- [9]. S. HARJANTO, R. P. GULTOM, B. SUHARNO dan H. W. ASHADI, *Jurnal Teknologi*, **XXI** (2) (2007) 135-139
- [10]. S. HARJANTO, P. SONY, B. SUHARNO dan H. W. ASHADI, Pengaruh Penambahan Kadar Kapur Terhadap sifat Fisik dan Mekanik Beton Aerasi Tanpa Proses Autoclave, *Prosiding Seminar Nasional Metalurgi dan Material I*, Depok (2007)
- [11]. X. AIMIN, D. JANA and S. L. SARKAR, *Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis of Concretes* , Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology (2000) 243
- [12]. M. S. J. GANI, *Cement and Concrete*, Chapman and Hall Publ., London, (1997) 5